

ANÁLISE DO CONCRETO SUBMETIDO A ATAQUE POR SULFATO DE FERRO EM ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO DO CARVÃO

Diego Zuehl Viscaldi (1), Bruno do Vale Silva (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)diegozuehl@gmail.com, (2)dovalesilva@unesc.net

RESUMO

Um dos problemas da região sul do Brasil é a degradação de áreas oriundas da mineração do carvão. Estas áreas degradadas possuem pirita, material que, em contato com água e oxigênio gera soluções com baixo pH e altas concentrações de Ferro, que atacam as estruturas de concreto afetando sua qualidade e durabilidade, colocando em risco seu desempenho e segurança. Com o objetivo de estudar alterações físico-químicas e mecânicas que o ataque de Sulfato de Ferro provoca ao concreto típico destinado a fundações, foram moldados corpos de prova e expostos em ambiente agressivo com presença deste sulfato. Estas amostras foram colocadas às margens de dois rios, um em Criciúma e o outro em Siderópolis, locais no qual onde há intenso depósito de rejeito de carvão. Foi feito também, um ataque simulado em laboratório com intuito de se aproximar as condições reais de campo. Realizou-se ensaios de Potencial Hidrogeniônico (pH), Resistência à Compressão Axial, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios X (DRX). De maneira geral os ataques geraram uma perda de resistência já nas idades iniciais, perda esta que se estendeu até a análise dos corpos de prova aos 84 dias de idade, chegando a uma diferença de 15,66% para menor em relação aos corpos de prova de referência. A partir da análise seguinte, que foi aos 118 dias de idade, a resistência à compressão axial apresentou um comportamento de estabilização. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a difração de raios X (DRX) possibilitaram a identificação de compostos gerados pelos ataques de sulfatos, contribuindo com a identificação de alguns elementos, como formação de etringita, que produz tensões internas no concreto e conseqüentemente fissuras.

Palavras-Chave: Sulfato de Ferro, fissuras, expansão, carvão, concreto.

1.INTRODUÇÃO

Na região Sul do Brasil encontra-se em elevada atividade de extração e beneficiamento de carvão, e como qualquer processo industrial existe geração de subprodutos, neste caso, o rejeito de carvão. Este apresenta em sua composição a pirita (FeS_2), que em contato com oxigênio e água oxida-se, gerando uma solução com baixo pH e altas concentrações de Ferro. Sabe-se que a água é uma das maiores causadoras de patologias em concreto, atuando como agente transportadora de íons agressivos, e também como fonte de degradação através de processos físico-químicos. O concreto por sua vez é um dos materiais estruturais

mais utilizados em construção civil, por conta de sua ampla utilização em diversas fases da construção, sendo este resultante principalmente da relação água/cimento (a/c). Esta relação é um dos parâmetros mais importantes, pelo fato de que ela determina a qualidade do concreto, isto é, define as características de compacidade ou porosidade da pasta de cimento endurecida. Segundo Cascudo (1997, p.74), uma baixa relação água/cimento retardará a difusão de cloretos, dióxido de carbono e oxigênio, além de dificultar a entrada de umidade e agentes agressivos para o interior do concreto.

Notadamente diminuindo-se a relação água/cimento, tem-se também uma redução nos valores dos poros e na permeabilidade, fatores estes intimamente ligados ao processo de corrosão.

De acordo com CIRIAReport C569 (2002, apud MILITITSKY *et al*, 2005, p.168) o mais significativo agente agressivo ao concreto de fundações é o sulfato, que tem ocorrência natural nos solos e em suas águas. Conforme BuildingResearch Establishment (2001, apud MILITITSKY *et al*, 2005, p.168), os fatores que influenciam o ataque por sulfatos são: (1) a quantidade e natureza do sulfato presente (quanto maior a concentração de sulfatos no solo ou na água subterrâneo, mais severo será o ataque), (2) o nível de água e sua variação sazonal, (3) o fluxo da água subterrânea e a porosidade do solo, (4) a forma da construção e (5) a qualidade do concreto.

O concreto que se encontra com todas suas faces expostas a água contendo Sulfato de Ferro, está menos vulnerável às patologias do que um concreto que tem uma ou mais superfície em que ocorra a evaporação da umidade.

O ataque por sulfato pode se manifestar na forma de expansão e fissuração do concreto. Quando o concreto fissura, sua permeabilidade aumenta e a água agressiva penetra mais facilmente em seu interior, acelerando, portanto, o processo de deterioração. Algumas vezes, a expansão do concreto pode causar problemas estruturais graves, [...]. O ataque por sulfato também pode se manifestar na diminuição progressiva de resistência e perda de massa devido à perda da coesão dos produtos de hidratação do cimento. (MEHTA & MONTEIRO, 2008, p.161)

Segundo Mehta & Monteiro (2008), a água com presença de sulfato penetra pelos poros da pasta de cimento endurecida e reage com os compostos da hidratação do cimento, formando compostos como etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{12} \cdot (\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) e gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). No processo de hidratação do cimento forma-se etringita primária,

após o sulfato de cálcio (CaSO_4) ser consumido ela se converte em monossulfato ($\text{Ca}_4\text{Al}_2(\text{OH})_{12}\cdot\text{SO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Quando entra em contato com sulfato externo se transforma novamente em etringita, denominada como etringita tardia. O que gera a expansão do composto e a possível desagregação. Em situações onde a presença de compostos de Al^{2+} for consumida, sobram SO_4^{2-} livres, assim a partir da reação dos monossulfatos e com o SO_4^{2-} e Ca^{2+} ocorrerá a formação da gipsita e não mais etringita. Quando há presença simultânea de sulfatos, carbonatos e baixas temperaturas podem ocorrer a formação de taumasita ($\text{Ca}_3[\text{Si}(\text{OH})_6]\text{CO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$).

Diante do exposto, esta pesquisa tem por objetivo geral analisar a influência do Sulfato de Ferro na perda da resistência à compressão do concreto e os compostos gerados por ele, num âmbito de ciclo de molhagem/secagem com renovação do sulfato. E a partir dos resultados obter parâmetros comparativos para o traço de concreto usualmente utilizado em fundações.

O presente trabalho aborda a análise do ataque por Sulfato de Ferro gerado pelo beneficiamento do rejeito de carvão ao concreto, tendo como agente transportador a água. Para tal propósito, a pesquisa desenvolvida consistiu em avaliar as implicações da ação danosa dos íons sulfatos sobre a resistência à compressão axial do concreto, além disso, as alterações de pH e microscopia do concreto.

Antevendo que elevadas resistências ou relação água/cimento são fatores necessários para uma baixa permeabilidade do concreto diante de ataques por sulfatos, a NBR 12655/2006 define alguns requisitos para concretos expostos a solução contendo sulfato (Tabela 1).

Tabela 1: Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos.

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO_4) presente no solo % em massa	Sulfato solúvel em água (SO_4) presente na água ppm	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto agregado normal*	Mínimo f_{ck} (para concreto com agregado normal e leve) Mpa
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	-	-
Moderada**	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,50	35
Severa***	Acima de 0,20	Acima de 1500	0,45	40

*Baixa relação água/cimento ou elevada resistência podem ser necessárias para obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão de armadura ou proteção à processos de congelamento e degelo.

**Água do mar

***Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos

Fonte: NBR 12655/2006.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para simular o ataque por Sulfato de Ferro no concreto, foram moldados corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, os quais foram expostos a água contendo o sulfato em questão. Foram moldados 48 corpos de prova na mesma betonada, e para controle de trabalhabilidade, foi realizado o ensaio de abatimento de tronco cone (*slump-test*), atendendo as especificações da NM 67/1996, onde se obteve 11 cm. Desses 48 corpos de prova, 24 ficaram em laboratório e 24 foram alocados as margens de dois rios da região, conforme Tabela 2. Estes corpos de prova dispostos em campo foram colocados em pontos específicos onde já se tinha conhecimento do elevado nível de sulfato (Tabela 3).

Tabela 2: Procedimento experimental com as quantidades de corpos de provas expostos a água contendo Sulfato de Ferro.

Dias	7	28	84	118	Total Parcial
Água Potável	3	3	3	3	12
Laboratório	3	3	3	3	12
Rio em Criciúma	3	3	3	3	12
Rio em Siderópolis	3	3	3	3	12
Total					48

Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

Tabela 3: Valores de sulfatos encontrados no local de exposição dos corpos de prova.

	sulfatos(mg.L ⁻¹)	
	coleta 1*	coleta 2**
Laboratório	820	820
Rio Santa Luzia (Criciúma)	585	1160
Rio Fiorita (Siderópolis)	121	168

1* coleta feita aos 28 dias, após um período de chuva.

2** coleta feita aos 84 dias, após um período de estiagem.

Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

A NBR 6118/2014 estipula um fator a/c de acordo com o grau de agressividade do ambiente. Nesta pesquisa utilizou-se um traço de concreto convencional, comumente utilizado em fundações, com fator água/cimento de 0,65, cimento Portland tipo CP IV e traço unitário de 1:3, 4:3, 6, conforme Tabela 4.

O quantitativo de material empregado para obtenção do volume de concreto utilizado é demonstrado na Tabela 5.

Tabela 4: Características do Traço de concreto.

Características do traço			
1 : m = areia + brita			7
a/c = água/cimento			0,65
aditivo superplastificante (%)			0,7
Traço unitário (1 : a : b)	1	3,40	3,60
teor de ar incorporado (%)			1
α_1 = teor de argamassa seca			55,00%
α_2 = teor de argamassa seca úmida			58,38%

Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

Tabela 5: Material utilizado para concretagem.

Volume total (litros)	80
Material	Qt (kg)
Cimento	22,66
Areia	77,03
Brita	81,56
Água	14,73
Superplastificante	0,159

Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

Utilizando a NBR 7215/1996 como referência normativa, cada corpo de prova foi adensado em duas etapas, sendo a primeira com metade do volume total do molde e a segunda com o volume total. Após concretados, os corpos de prova foram submetidos a um período de cura inicial ao ar, terminado este período, foram desmoldados e separados em quatro grupos contendo 12 corpos de prova cada (Figura 1). O primeiro grupo foi separado para curar em um tanque contendo uma solução de hidróxido de cálcio a fim de servir como referência, o segundo grupo foi colocado em um reservatório contendo Sulfato de Ferro, para simular o ataque ao concreto em um ambiente agressivo, o terceiro e quarto grupo foram dispostos a margens de dois rios, nas cidades de Criciúma e Siderópolis respectivamente, localizados em regiões contaminadas com Sulfato de Ferro devido à presença do rejeito de beneficiamento do carvão.

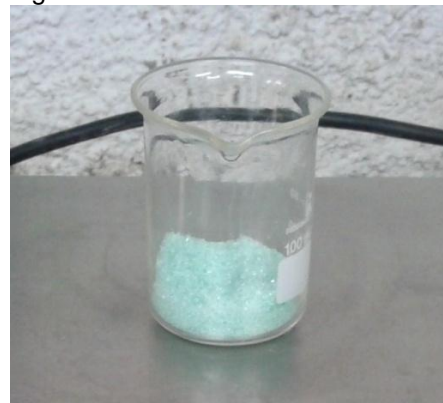
Os corpos de prova do laboratório estavam em um recipiente onde havia 16 litros de água contendo 820 mg/l do Sulfato de Ferro (Figura 2). Este volume de água foi adicionado com o intuito de atacar apenas metade de cada corpo de prova, com a intenção de deixar parte destes expostos ao ambiente.

Figura 1: grupo com 12 corpos de prova.



Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

Figura 2: Sulfato de Ferro.



Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

Estes corpos de prova ainda eram virados a cada 7 dias para ocorrer o ciclo de molhagem/secagem, e tinha sua solução de Sulfato de Ferro renovada a cada 28 dias. A Tabela 6 apresenta em valores quantitativos em gramas (g) de Sulfato de Ferro adicionado ao recipiente.

Tabela 6: Composição da concentração de Sulfato de Ferro

	Peso da Molécula (g)	Peso H ₂ O (g)	Peso do Sulfato de Ferro (g)	Concentração	Concentração (mg/l)
Sulfato de Ferro - FeSO ₄ ·7H ₂ O	278,01	126	152,01	0,546778893	1500

Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

Após a exposição dos corpos de prova ao ataque por sulfato nas idades apresentadas na Tabela 2, os mesmos foram submetidos ao ensaio de compressão axial. Tais avaliações consistiam em identificar as alterações na propriedade mecânica dos corpos de prova de concreto atacados, em relação aos de referência, e assim relacioná-los com os produtos provenientes das reações químicas entre os compostos hidratados do cimento e os íons sulfato presentes na solução.

Figura 3: Corpos de Prova expostos ao Sulfato de Ferro, em Laboratório¹⁾, no rio em Criciúma²⁾ e no rio em Siderópolis³⁾.



Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

A Figura 3 mostra os corpos de prova em laboratório e colocados nas margens dos rios em Criciúma e em Siderópolis.

2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

No período de ataque químico por Sulfato de Ferro, os corpos de prova cilíndricos ($\Phi 10$ cm x 20 cm) pré-estabelecidos são retirados do local onde se encontra a solução agressiva para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial, com finalidade de avaliar o desempenho dos elementos expostos em laboratório e em campo. Foram ensaiados periodicamente, sendo subdivididos em quatro idades: 07, 28, 84 e 118 dias. Para cada idade de ruptura analisada foram ensaiados três corpos de provas segundo as recomendações da norma NBR 12655/2006, como já especificado na Tabela 2.

2.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Aos 84 dias de idade os corpos de prova que permaneceram expostos ao ataque de Sulfato de Ferro em laboratório e em campo, foram submetidos a uma avaliação microestrutural através da técnica de análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV). No ensaio realizado, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura ZEISS (Figura 4), modelo MA10, contendo espectrômetros de energia dispersiva (EDS) BRUKER, modelo QUANTAX 200. Para tal foram retiradas amostras cúbicas de 5,0 mm dos corpos de provas cilíndricos ($\Phi 10$ cm x 20 cm) após ensaio de compressão, sendo estas cortadas com precisão milimétrica (ISOMET 1000) como apresenta a Figura 5.

Figura 4: MEV/EDS.



Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

Figura 5: ISOMET 1000.



Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

As amostras dos corpos de provas e as coletadas em campo permaneceram em uma estufa a 80°C, durante vinte e quatro horas antes da realização do ensaio. O objetivo era identificar possíveis fissuras e ao mesmo tempo analisar os compostos gerados nos concretos atacados em relação ao de referência.

2.3 POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH)

Verificou-se o pH do concreto aos 84 dias de idade dos corpos de provas submetidos ao ataque de Sulfato de Ferro, em laboratório e em campo. A verificação ocorreu através da leitura do pHmetro, no qual foi adicionado em uma solução de água destilada e 2 gramas do material passante na peneira nº 200. O ensaio teve por objetivo avaliar se o concreto apresentou alguma redução do teor de pH devido à acidez da água.

2.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

Os ensaios de difração de raios-x (DRX) permitiram identificar sólidos cristalinos, através de picos gerados na difração dos raios produzidos pelos átomos característicos do mineral, identificando a formação dos compostos do concreto, tais como, etringita, gipsita, taumasita, brucita, silicato de magnésio hidratado e monossulfatos. No ensaio realizado utilizou-se o equipamento LabX, modelo XRD 6000 (Figura 6).

Figura 6: Equipamento de DRX.



Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

De maneira geral, os corpos de provas apresentaram uma perda de resistência logo nas idades iniciais de rompimento, sendo esta gradativa até a idade de 84 dias. A exceção foram corpos de prova do rio em Criciúma aos 28 dias, e na idade posterior aos 84 dias. Verificou-se um ganho de resistência dos corpos de prova em relação ao de referência, mostrando uma possível estabilização até certo período (Tabela 7 e Figura 8).

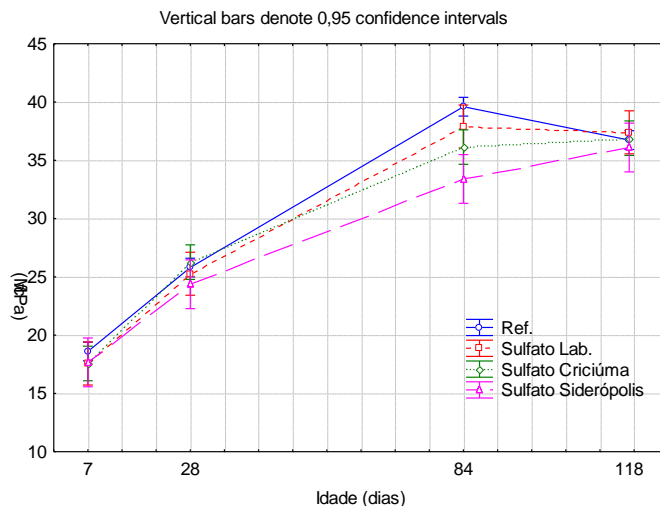
Tabela 7: Composição das concentrações de Sulfato de Ferro por amostra.

Dias	7			28			84			118		
	Mpa (média)	Desvio Padrão	Variação em % com relação ao CP de referência	Mpa (média)	Desvio Padrão	Variação em % com relação ao CP de referência	Mpa (média)	Desvio Padrão	Variação em % com relação ao CP de referência	Mpa (média)	Desvio Padrão	Variação em % com relação ao CP de referência
Referência	18,60	0,30	-	25,80	0,95	-	39,60	0,20	-	36,73	0,64	-
CP Laboratório	17,57	1,27	-5,56	25,27	0,80	-2,07	37,90	2,27	-4,29	37,40	0,53	1,81
CP Criciúma	17,57	0,65	-5,56	26,27	0,91	1,81	36,13	1,89	-8,75	36,90	0,36	0,45
CP Siderópolis	17,67	0,49	-5,02	24,37	0,75	-5,56	33,40	2,85	-15,66	36,10	0,96	-1,72

Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

Realizou-se uma análise estatística por meio do teste de variância (ANOVA) em conjunto com o teste de Tukey para avaliar se os valores obtidos nos ensaios de compressão axial são estatisticamente diferentes entre as distintas idades ensaiadas a um nível de confiança de 95%.

Figura 7: Resultados dos ensaios de compressão axial comparados entre as idades.



Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

No gráfico da Figura 7 está a análise com os respectivos intervalos de confiança de 95%. Nota-se que os resultados aos 84 e 118 dias são estaticamente iguais para os corpos de prova com sulfato em laboratório, no rio de Criciúma e no rio de Siderópolis, como compravam as Tabelas 8, 9, 10 e 11, que mostram os testes de Tukey realizados.

Tabela 8: Resultados de referência comparados entre as idades.

Idade (dias)	{1}	{2}	{3}	{4}
	18,600	25,800	39,600	36,733
7		0,000231	0,000231	0,000231
28	0,000231		0,000231	0,000231
84	0,000231	0,000231		0,001920
118	0,000231	0,000231	0,001920	

Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

Tabela 9: Resultados dos cps com ataque por sulfato em laboratório comparado entre as idades.

Idade (dias)	{1}	{2}	{3}	{4}
	17,567	26,267	36,133	36,900
7		0,000260	0,000231	0,000231
28	0,000260		0,000238	0,000233
84	0,000231	0,000238		0,832903
118	0,000231	0,000233	0,832903	

Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

Tabela 10: Resultados dos cps com ataque por sulfato em Siderópolis comparado entre as idades.

Idade (dias)	{1}	{2}	{3}	{4}
	17,567	26,267	37,900	37,400
7		0,000798	0,000231	0,000231
28	0,000798		0,000236	0,000239
84	0,000231	0,000236		0,969476
118	0,000231	0,000239	0,969476	

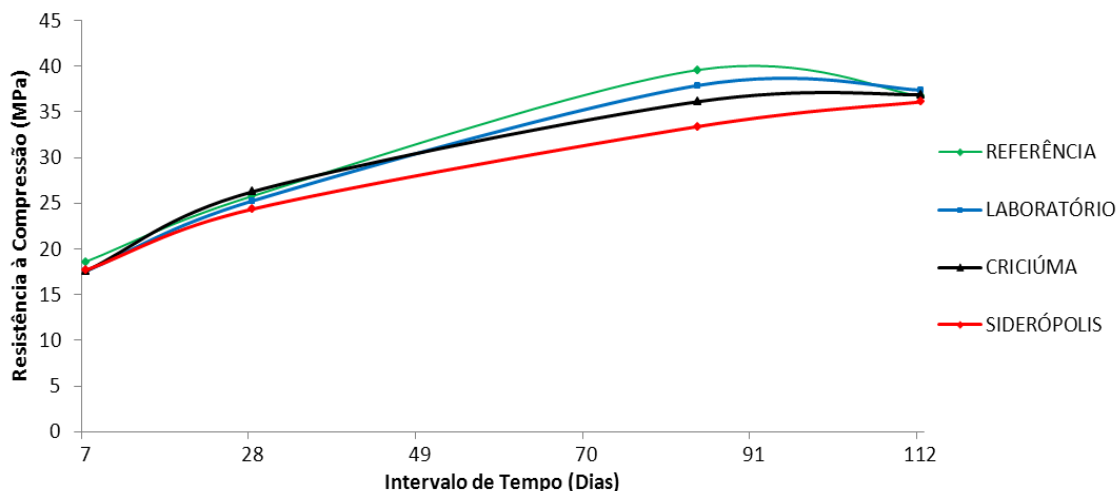
Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

Tabela 11: Resultados dos cps com ataque por sulfato em Criciúma comparado entre as idades.

Idade (dias)	{1}	{2}	{3}	{4}
	17,667	24,367	33,400	36,100
7		0,003662	0,000232	0,000231
28	0,003662		0,000671	0,000276
84	0,000232	0,000671		0,230105
118	0,000231	0,000276	0,230105	

Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

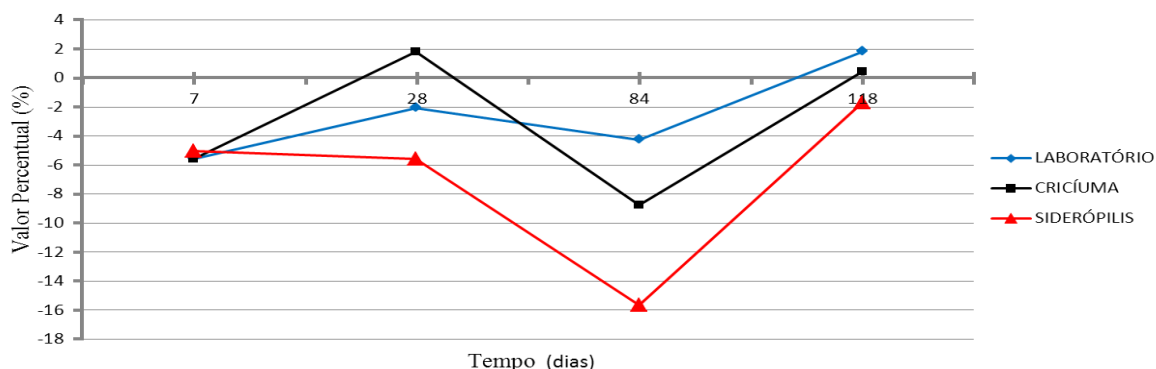
Figura 8: Resistência à Compressão dos corpos de provas submetidos a Sulfato de Ferro.



Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

A variação dos valores de resistência à compressão em comparação aos de referência não apresentam um comportamento linear, mas como regra geral apresentou uma perda de resistência já nos primeiros 7 dias de idade. Com exceção dos corpos de prova do rio de Criciúma, que aos 28 dias obteve um ganho de 1,81% (Figura 9). Em comparação ao trabalho desenvolvido por Cesario (2014), que testou o ataque de diferentes sulfatos, demonstrou que aos 7 dias de idade não houve queda ou ganho, já aos 28 dias ocorreu um ganho de 8 % para o sulfato de ferro.

Figura 9: Variação de Resistência à Compressão dos corpos de provas submetidos à ataque de Sulfato de Ferro com relação ao de Referência.



Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

Em análise comparativa a métodos tradicionais como, Mehta Test (MEHTA & GJORV, 1974 apud VEIGA, 2011, p.54) que utiliza oito corpos de prova cúbicos de pastas, com a/c iguais a 0,5, submersos em sulfato de sódio. Também se considera

o cimento como sendo resistente ao ataque de sulfato, se a queda de resistência aos 28 dias de imersão for inferior a 20%. Sendo a concentração de sulfato de Ferro adotada nesta pesquisa de 0,082% e a variação média da resistência aos 28 dias de todas as amostras foi inferior a 20%, em uma interpretação de acordo com a recomendação do Mehta test, podemos considerar que o cimento empregado nesta análise, foi de um cimento resistente a sulfatos.

Os resultados obtidos no potencial hidrogeniônico (pH) dos corpos de prova atacados pelo Sulfato de Ferro apresentam um pH de menor valor em relação ao de referência, como indica a Tabela 12. Os resultados obtidos foram similares ao trabalho desenvolvido por Cesário (2014), onde o ataque por sulfato de ferro diminuiu o pH da amostra de 11,68 para 10,13.

Tabela 12: Potencial Hidrogeniônico (pH) das amostras expostas ao Sulfato de Ferro.

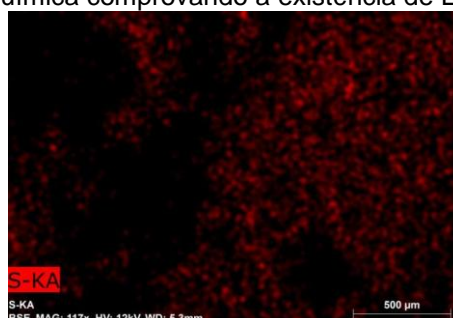
	CP's de Referência	CP's de Laboratório	CP's de Criciúma	CP's de Siderópolis
Potencial Hidrogeniônico (pH)	11,25	10,34	10,38	10,13
Temperatura (°C)	29	29	29	29

Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

3.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Nos corpos de prova analisados foi detectado a presença de Enxofre (SO₂ e SO₃), (Figura 10), estes penetram no concreto, reagem com a água formando ácido sulfúrico, que reagem com o alumínio tricalcio, formando o sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita). Esta última reação provoca o aumento de volume criando tensões internas que causa fissuras e desagregam o concreto.

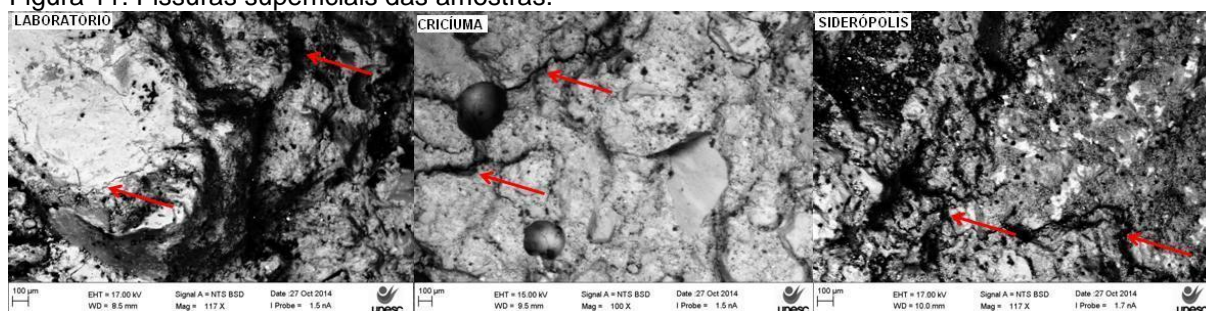
Figura 10: Análise química comprovando a existência de Enxofre nas amostras.



Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

As amostras expostas ao ataque de Sulfato de Ferro quando observadas microscopicamente, apresentam fissuras superficiais conforme Figura 11, sendo que nas amostras expostas em água potável não foram detectadas fissuras.

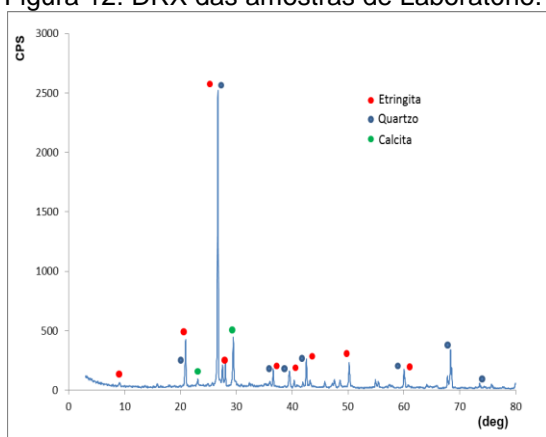
Figura 11: Fissuras superficiais das amostras.



Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

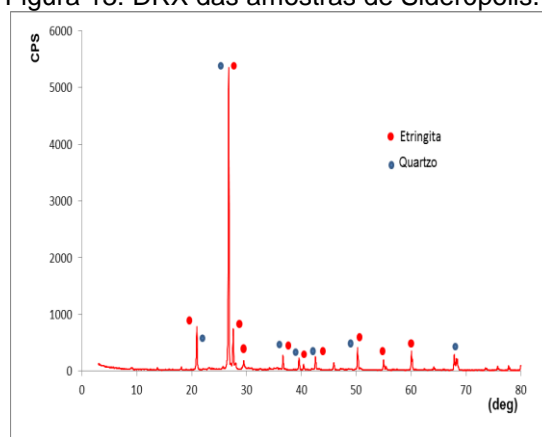
A formação de Sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita) foi identificada nos corpos de prova expostos em laboratório e do rio em Siderópolis como mostrado na Figura 12, 13, 14 e 15.

Figura 12: DRX das amostras de Laboratório.



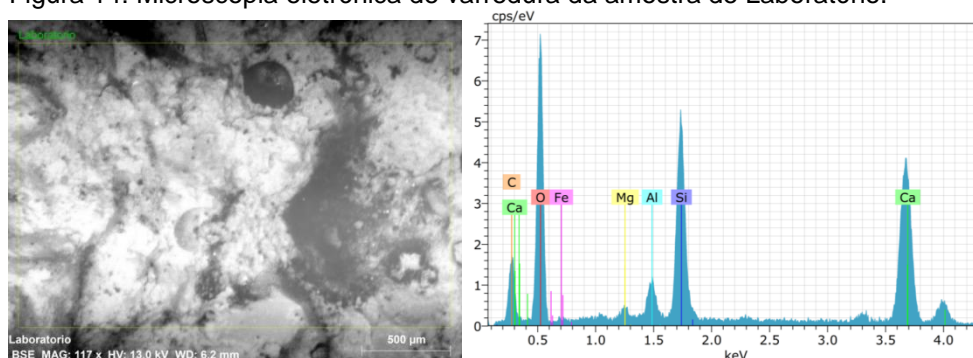
Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

Figura 13: DRX das amostras de Siderópolis.



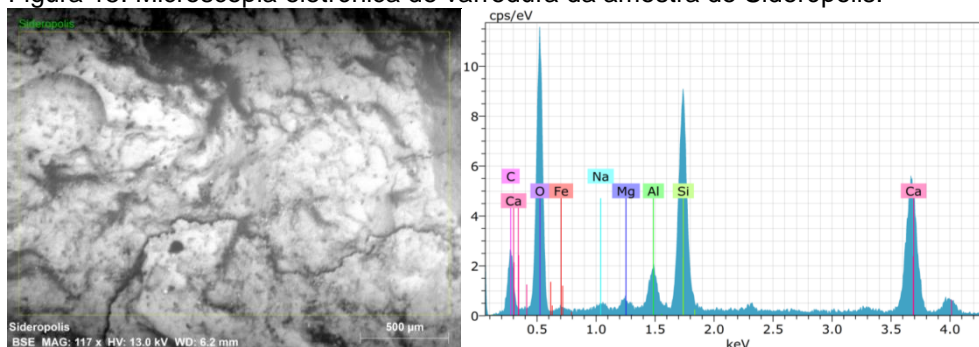
Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

Figura 14: Microscopia eletrônica de varredura da amostra de Laboratório.



Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

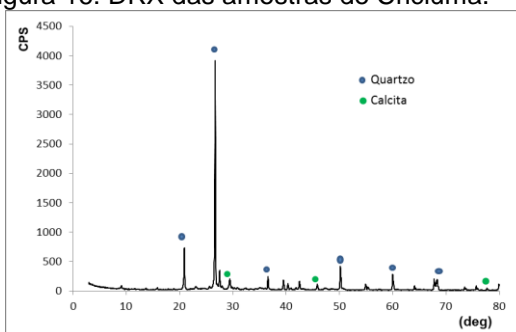
Figura 15: Microscopia eletrônica de varredura da amostra de Siderópolis.



Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

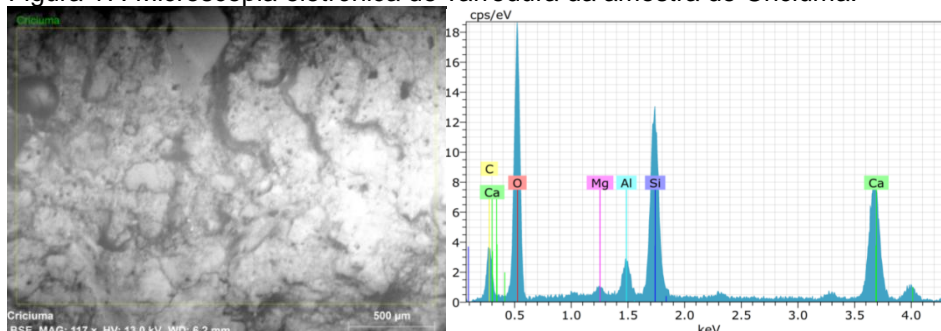
Nos corpos de prova expostos no rio em Criciúma não se detectou a formação de etringita (Figura 16 e 17), que pode ser justificado segundo Casanova e Aguado(1996, apud GOMIDES & ANDRADE *et al*, p. 3), que diz que, no concreto as reações de oxidação dos sulfetos (reação da pirita, água e oxigênio) produzem em primeira instância uma variação volumétrica que oscila entre 3,05 cm³ e 6,04 cm³ por mol de sulfeto, este acréscimo volumétrico é devido basicamente a formação de hidróxido de ferro [Fe(OH)₃] (não levando em conta ainda a formação de etringita, que se formará em um período posterior) e é considerado relativamente pequeno.

Figura 16: DRX das amostras de Criciúma.



Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

Figura 17: Microscopia eletrônica de varredura da amostra de Criciúma.



Fonte: Diego Zuehl Viscaldi, 2014.

4. CONCLUSÕES

Constatou-se que a metodologia utilizada para desencadear e acelerar as alterações físicas e químicas dos sulfatos, ou seja, armazenar os corpos de prova em ambiente com presença de água sulfatada com uma ou mais face exposta ao oxigênio foi apropriada para tal pesquisa. Constata-se ainda que a água com presença de Sulfato de Ferro em concentrações reais de campo apresenta alterações em sua estrutura. Tendo como referência os resultados dos estudos laboratoriais pode-se dizer ainda que a estrutura do concreto apresenta alterações químicas que podem ter afetado sua integridade.

Ao longo do ataque nota-se ainda a estabilização do processo, que pode estar associada no preenchimento dos poros do concreto, dificultando a renovação do sulfato e evitando a difusão de novas reações química, fator que certamente contribuiu para reduzir a expansão existente.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a difração de raios X (DRX) revelaram ser fundamentais para as análises do fenômeno expansão, pois possibilita a identificação dos compostos químicos gerados e outros minerais presentes, contribuindo deste modo para a obtenção de importantes parâmetros que permitem uma melhor interpretação desse tipo de manifestação patológica no concreto investigado. Através destes testes possibilitou-se a identificação de sulfoaluminatos (etringita), elemento conhecido por causar tensões internas no concreto e provocar expansões. Nesse estudo não foi identificado a formação de taumasita, podendo ser justificado pela condição específica favorável que a mesma necessita para sua formação, sendo esta, que só ocorrerá se a amostra ficar exposta ao sulfato em um ambiente com temperatura inferior a 5 °C.

Levando em consideração que a presente pesquisa analisou somente a influência da água como agente transportador de sulfatos fica para sugestões para trabalhos futuros, analisar o concreto a partir da influência de presença de sulfatos no solo, analisar por maior tempo e com maior número de amostras, analisar com diferentes tipos de sulfatos ou desenvolver um modelo matemático de parâmetros de concreto que podem ser utilizados em fundações através de outros trabalhos já estudados.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto; procedimentos.** Rio de Janeiro, 2014, 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1996, 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle e recebimento; procedimento.** Rio de Janeiro, 2006, 18 p.

CASANOVA, I.; AGULLÓ, L.; AGUADO, A. **Aggregate expansivity due to sulfide oxidation – reaction system and model, Cement and concrete research, v.26,n.7.** 1996, 998 p.

CASCUDO, Oswaldo. **O controle da corrosão de armaduras em concreto – inspeção e técnicas eletroquímicas.** Editora: Pini, São Paulo, 1997, 237 p.

CESÁRIO, Andressa Pelegrin. **Análise do desempenho do concreto utilizado em fundações submetido à ataque por sulfato.** 2014, 23 p. Artigo submetido ao Curso de Engenharia Civil da UNESC -como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Civil.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete -Microestrutura, Propriedades, e Materiais.** Editora: IBRACON, São Paulo, (1ªed.), 2008, 674 p.

GOMIDES, M.; ANDRADE, M. **Investigação da expansão em laboratório de concretos contendo agregados com sulfetos.**

MILITITSKY, Jarbas; CONSOLI, Nilo Cesar; SCHNAID, Fernando. **Patologia das Fundações.** Editora: Oficina de Textos, São Paulo, 205, 207.

NORMA MERCOSUR. NM 67: **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** 1996, 6 p.

AGRADECIMENTOS

Ao laboratório Experimental de Estruturas (LEE), em especial ao professor orientador Bruno do Vale Silva, pela dedicação e apoio em todas as fases deste trabalho.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), na pessoa do professor Fernando Pelisser pela disponibilidade e apoio nos ensaios de Resistência à Compressão e potencial hidrogeniônico (pH).

Ao laboratório de Cerâmica Técnica (CerTec), na pessoa do professor Oscar Rubem Klegues Montedo, pela disponibilização e apoio nos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Ao Laboratório de Caracterização de Materiais (CECAM), na pessoa do Engenheiro De Materiais Mateus Milanez, pela disponibilização e apoio nos ensaios de Difração De raios X (DRX).

A Andressa Pelegrin Cesário, Evelice Pavei e Hudson Teixeira de Oliveira pela participação direta neste trabalho. Finalmente a todas as pessoas que contribuíram de forma direta ou indiretamente para a conclusão desta pesquisa.